

# Calidad de reservorio y estratigrafía del intervalo de Mowry y Muddy de la cuenca del río Powder, Wyoming, EE.UU.

Ceri Davies<sup>1\*</sup>, Simon Purvis<sup>1</sup>, Ron Kenny<sup>1</sup>, Jim Fenton<sup>1</sup>, Vishnu Pandey<sup>1</sup>, Krista Geesaman<sup>1</sup>, Rick Trevino<sup>1</sup>, Chris Iwobi<sup>1</sup>, Martin Watford<sup>1</sup> y Sushanta Bose<sup>1</sup> consideran el significativo potencial sin explorar de los dos plays.

El interés en la cuenca del río Powder (PRB, por sus siglas en inglés) de Wyoming, noroeste de EE.UU., ha aumentado en los últimos años, ya que es una cuenca madura con varios plays prolíficos apilados, junto con la promesa y la oportunidad de unos pocos plays emergentes clave. El Esquisto Mowry es uno de los plays no convencionales emergentes e históricamente se ha caracterizado como una roca generadora clave para la Arenisca Muddy infrayacente y otros yacimientos más someros. Se considera que tanto el Esquisto Mowry como la Arenisca Muddy están poco explorados y tienen un potencial posiblemente significativo.

Considerando esos dos plays de manera conjunta, los contrastes entre las oportunidades convencionales y no convencionales son claros. A pesar de que su nombre sugiere otra cosa, en su forma real el Miembro Muddy es una arenisca de estuario fluvial y, cuando se encuentra, normalmente es limpia y bien seleccionada. Por otro lado, Mowry es una lutita marina somera, ubicada aunque bastante heterogénea en la cuenca. Las actividades de perforación sugieren que la industria está batallando para entender los controles estratigráficos y espaciales para explotar Mowry como un objetivo no convencional. Al discutir la prospectividad del intervalo

de Mowry y Muddy, un tema común es: “Sabemos dónde está Mowry, pero no sabemos dónde es buena; sabemos que Muddy es buena, pero no sabemos dónde está.”

Para abordar esas cuestiones, se encargó un proyecto geocientífico integrado para estudiar la zona con el objetivo de refinar el marco estratigráfico, mejorar los conocimientos acerca del contexto de depósito y revisar la prospectividad general de esos plays. Como parte del proyecto, se analizaron e interpretaron 1173 pies de testigos y los registros cableados asociados de 14 pozos clave para abordar problemas específicos. Se tomaron doscientas setenta y cuatro muestras de piezas de testigos a intervalos de aproximadamente cuatro pies y hubo una concentración alrededor de los límites estratigráficos clave. Además, una serie complementaria de 51 muestras de campo de afloramientos de la PRB occidental y la cuenca del río Wind han proporcionado un control adicional y valiosos datos análogos para complementar el conjunto de datos del subsuelo. El proyecto utilizó prospecciones sísmicas 3D recientes-antiguas que abarcan el margen occidental del área de estudio (Figura 1).

El objetivo principal de la investigación se centró en la calidad de reservorio y la estratigrafía interna del intervalo de Mowry y Muddy. Esas interpretaciones se han ampliado

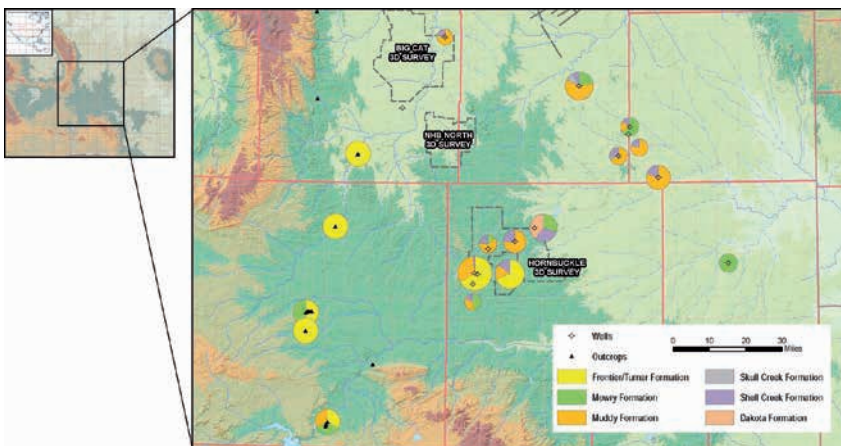


Figura 1 Mapa del área de estudio: pozos analizados con la distribución de las formaciones, la cobertura sísmica y las localizaciones de los campos.

<sup>1</sup> CGG.

\* Autor de contacto: [ceri.davies@cgg.com](mailto:ceri.davies@cgg.com)

## Cuencas y geología del petróleo

desde los estudios de testigos iniciales hasta el intervalo de estudio completo pasando por la calibración hasta las series de registros cableados disponibles y los derivados petrofísicos asociados. Finalmente, las interpretaciones se mejoraron mediante la calibración con las propiedades elásticas derivadas de la inversión preapilado de los datos sísmicos y los análisis de rocas. Con los datos sísmicos y de pozo como control, la interpretación se extendió a través de la cuenca, permitiendo cartografiar la extensión y el carácter de las unidades clave Mowry y Muddy como un medio para evaluar los riesgos de exploración y las oportunidades de este play en evolución.

### Paleogeografía y clima

La PRB es una cuenca de dirección norte-sur y buzamiento hacia el oeste que se asemeja a un sinclinal asimétrico y documenta tres fases tectónicas significativas: 1) ensamblaje continental proterozoico; 2) sistema de retroarco de antepaís mesozoico; y 3) compartimentación Laramide en losas planas del sistema de antepaís (Melick, 2013).

Durante el Mesozoico, la PRB ocupaba una posición oriental-central dentro de la cuenca Interior Occidental (WIB, por sus siglas en inglés) de Norteamérica. Fue durante este periodo en el que las cuencas sedimentarias del oeste de Norteamérica se relacionaron con la geodinámica de un margen continental occidental activo (Dickinson, 2004).

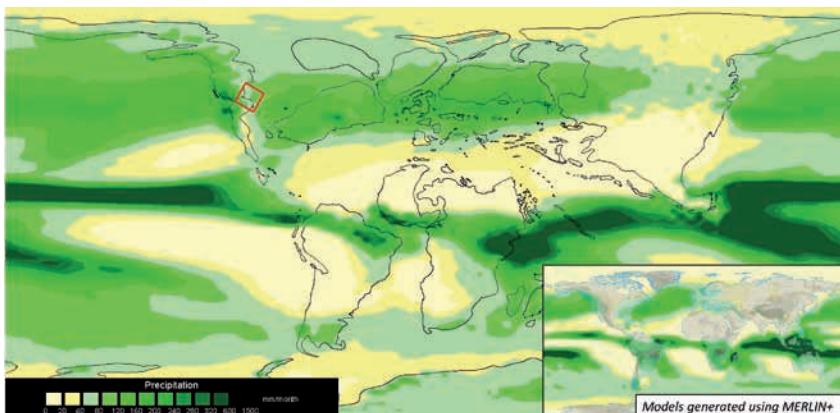
El margen occidental de la WIB estaba dominado por zonas de subsidencia máxima, las cuales disminuían hacia el este dando lugar a una amplia zona oriental-central de arqueamiento marginal y fosa distal (Miall et al., 2008). En el Cretácico Medio (~100 Ma), tenía lugar una subducción de bajo ángulo tan al norte como hasta 60° N, evolucionando hacia una región limitada de subducción de losas planas durante principios del Cretácico Superior (~90 Ma). Fue durante el Cretácico cuando la WIB fue inundada y drenada por una serie de transgresiones marinas. En el pico de la inundación, el brazo de mar cretácico se extendió desde el Ártico de Canadá y Alaska hacia el sur hasta el golfo de México, con probables conexiones intermitentes con la

región de la bahía de Hudson (Davis et al., 1989; Kauffman, 1984).

Estudios climáticos del Cretácico Medio (Albiense a Turoniense) sugieren que las tasas de precipitación oscilaban desde ca. 80 hasta ca. 160 pulgadas/año (White et al., 2001; Brenner et al., 2003) y hasta valores máximos de ca. 220 pulgadas/año (Ufnar et al., 2008). Para ponerlo en contexto, el rango actual de precipitaciones para una latitud similar (45°N) en Norteamérica es de ca. 33 pulgadas/año (Barron et al., 1989). Esas estimaciones son coherentes con las predicciones que aporta una herramienta de predicción de facies de las paleo-fuentes basada en técnicas de modelización de sistemas terrestres globales (Figura 2).

### Marco estratigráfico y análisis integrado de facies

La sedimentología y las facies de depósito de las unidades objetivo fueron determinadas a partir de estudios detallados de testigos, incluyendo descripciones de testigos a escala 1:50. Las descripciones de los testigos se complementaron con datos de composición mineral e información textural derivados de análisis mineralógicos automáticos realizados sobre muestras seleccionadas de testigos clave y en todas las muestras de campo recolectadas utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) (Oliver et al., 2013). Para ayudar a desarrollar un marco cronoestratigráfico robusto, se estableció un detallado flujo de trabajo bioestratigráfico multidisciplinar utilizando la misma serie de muestras de testigos y muestras de campo. El marco bioestratigráfico incluyó el análisis detallado de los microfósiles y las asociaciones faunísticas principalmente para comprender el ambiente de depósito y posteriormente determinar la estratigrafía. Tras una cuidadosa investigación, que involucró revisar cuestiones de riqueza y conservación, se consideró que la palinología cuantitativa era la herramienta estratigráfica más adecuada para el proyecto. Una interpretación y un análisis muy detallados de los palinomorfos observados ayudaron en este contexto y permitieron realizar una relación con los registros de pozo para obtener una cronoestratigrafía coherente y determinar un ambiente de depósito que se pudieran



**Figura 2** La precipitación anual promedio del área de estudio (recuadro rojo) es de > 100 pulgadas, diez veces la actual (inserto).

# Cuencas y geología del petróleo

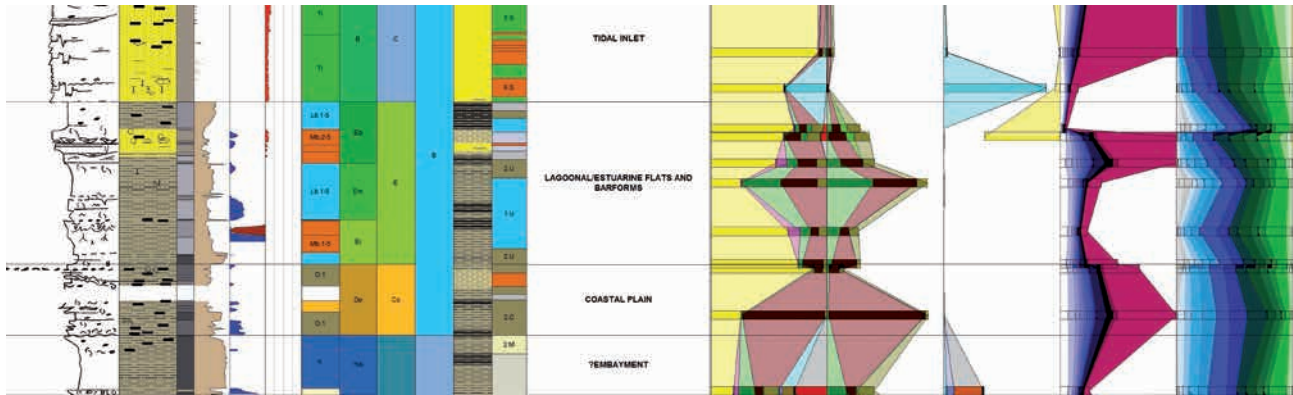


Figura 3 Esquema resumen de los pozos de ejemplo.

cartografiar a través de la región con la ayuda de técnicas sísmicas de caracterización de yacimientos.

Se utilizaron datos de facies con el conjunto de datos palinológicos para desarrollar un marco estratigráfico y una historia de depósito robustos de las Formaciones Thermopolis a Frontier. Dentro de este marco, el miembro Muddy de la Formación Thermopolis se subdividió en cinco unidades (A-E) con diferentes ambientes de depósito (canales de entrada de la marea, barras de arena, canales, barras de boca, etc.). La Formación Mowry se depositó en un contexto de plataforma y se puede subdividir en tres miembros (F-H) dependiendo de los diferentes estados de oxigenación y variaciones en la entrada de sedimentos. Las facies se extrapolaron dentro de los intervalos sin testigos utilizando métodos petrofísicos (Figura 3).

Las facies sedimentológicas se agruparon en cinco facies registradas (lutita, lutita de baja densidad, arena lutítica, arena no convencional y arena convencional) y se pudieron separar en base a las propiedades elásticas ( $V_p$ ,  $V_s$  y densidad) y a los parámetros petrofísicos (porosidad, saturación de agua y volumen de arcilla). La inversión sísmica preapilado y las litofacies elásticas se pueden utilizar para rellenar el hueco entre las interpretaciones sedimentológicas y las de las propiedades sísmicas de la roca (Castillo et al., 2014).  $V_p/V_s$  y la impedancia acústica fueron las variables clave que permitieron ampliar las interpretaciones desde la base de datos de pozo dentro del volumen sísmico. Con un marco estratigráfico revisado y conocimientos sobre los controles litológicos y de facies de las respuestas sísmicas, los datos sísmicos se pudieron interpretar con precisión y confianza.

Se generó un modelo geológico 3D para el volumen de Muddy y Mowry en las áreas con sísmica, poblado con los datos sísmicos invertidos. El modelo de facies creado sobre las zonas con datos sísmicos 3D disponibles se ha utilizado para validar la ampliación del modelo geológico más general fuera del control de los pozos y se ha utilizado para restringir el desarrollo de un modelo de depósito de escala regional y la posterior cartografía regional de los elementos clave de las formaciones objetivo.

## Petrografía, diagénesis y calidad de reservorio

Se realizó un análisis petrográfico detallado utilizando la microscopía óptica cuantitativa mejorada mediante métodos mineralógicos automatizados de SEM para determinar las fases detríticas y autigénicas principales y la porosidad y la fragilidad de cada facies (Figura 4).

Las texturas y fases detríticas observadas en todas las muestras revelan un sistema textural y mineralógicamente maduro, estando la mayoría de las muestras bien seleccionadas, bien redondeadas y siendo principalmente de composición arenosa. Los cementos autigénicos más abundantes son recrecimientos de cuarzo con elevadas cantidades de cementos de calcita y hematite localizados. Las arcillas autigénicas más importantes son las illitas, siendo también común la caolinita. La pérdida de porosidad eficaz debida a la diagénesis ha sido principalmente a través de la compactación (exagerada por las fases dúctiles), la cementación de cuarzo y la precipitación de illita. La cementación de calcita y hematite y la precipitación de caolinita son fases menos abundantes, pero localmente afectan de manera adversa a la porosidad eficaz.

Los cambios reológicos asociados con la intensidad de la alteración diagenética, definida a partir de la combinación de los análisis petrográficos y SEM, muestran una buena

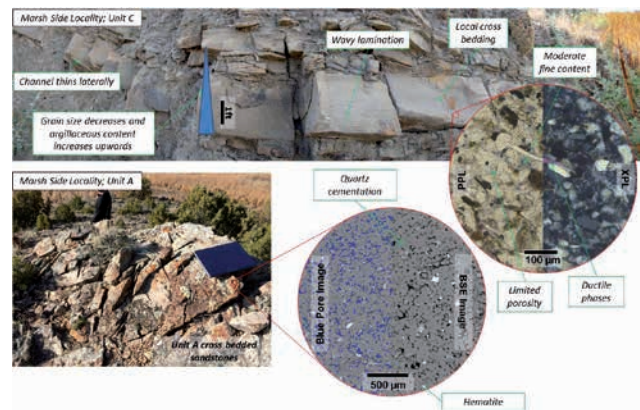


Figura 4 Afloramiento y análisis de Electrones Retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) de las Unidades A y C.

## Cuencas y geología del petróleo

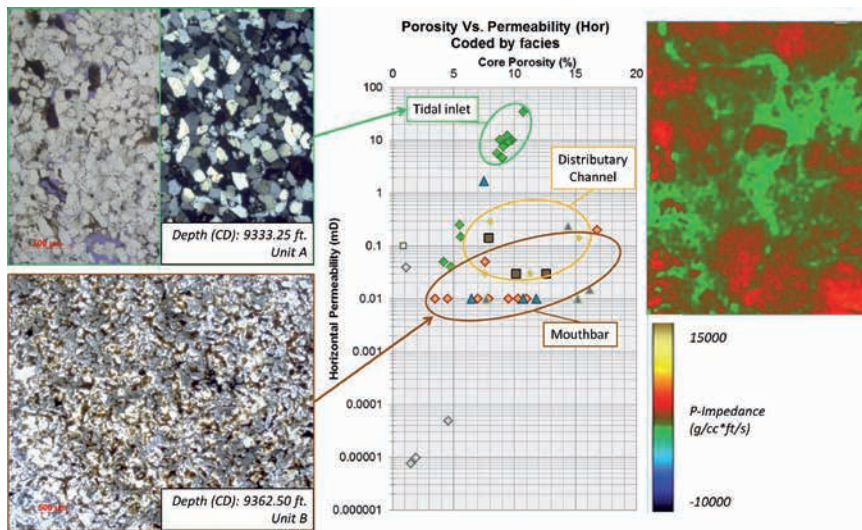


Figura 5 Izquierda: láminas delgadas de las Unidades A y B. Centro: gráfico de porosidad vs. permeabilidad de testigos. Derecha: elementos sinuosos, bandeados, de bajo valor que destacan geometrías de canales mareales en el mapa de impedancia P.

correlación con la impedancia acústica tanto en los registros de pozo como en los datos sísmicos.

En general, las argilitas de la Formación Mowry contienen una componente variable, pero a menudo elevada, de limo detrítico de origen principalmente cuarzoso. El elevado contenido silíceo de algunos intervalos se ha vinculado con una fuente silíceo adicional asociada con la disolución y la recristalización de sílice de origen biogénico (radiolarios) (Byers y Larson, 1979). Sin embargo, este estudio no ha documentado un contenido silíceo significativamente elevado y no se ha podido desarrollar una evidencia clara de una fuente biogénica de sílice. Por tanto, se considera que la mayor parte del contenido silíceo de las muestras del estudio tiene un origen detrítico, asociado con entradas terrestres, posiblemente intensificado por la sílice originada a partir de los materiales volcánicos, de los cuales las capas de bentonita son una evidente fuente potencial. Esta última observación está respaldada por la asociación común observada en los afloramientos entre las capas de bentonita y las lutitas muy endurecidas inmediatamente adyacentes.

### Integración e interpretación

El flujo de trabajo de Testigos-Registros-Sísmica ha revelado varias observaciones y consideraciones clave al evaluar el intervalo de Muddy y Mowry en la PRB. Se han establecido análisis de facies y descripciones litológicas para los 14 pozos de estudio, que se utilizaron para restringir y mejorar el análisis petrofísico y permitir la extrapolación dentro de intervalos sin testigos. La palinología cuantitativa, integrada con la descripción de facies sedimentarias, se utilizó para establecer un marco cronoestratigráfico robusto para los intervalos albienses a cenomanienses. Además, los cambios de composición de las asociaciones de microplancton y miosporas han proporcionado información crítica para la interpretación paleoambiental de los intervalos estudiados.

El Miembro Muddy de la Formación Thermopolis está caracterizado por ambientes costeros, en el cual se observan facies arenosas de buena calidad, como entradas mareales, barras mareales de arena y canales, dentro de las Unidades A, B y D, respectivamente. Por el contrario, en las Unidades C y E se observan facies arenosas más arcillosas, como barras de boca, canales distributarios y canales de grano más fino. Las facies mareales arenosas están ampliamente distribuidas, pero los canales (predominantemente Unidad D) están muy localizados. Se puede cartografiar un distintivo límite geográfico entre las dos facies utilizando una combinación de observaciones sísmicas y de testigos.

Las entradas mareales y las arenas de los canales de las Unidades A y B forman los yacimientos convencionales de mejor calidad del intervalo objetivo, con paquetes de arena limpia apilados y texturas que indican un sistema de depósito relativamente maduro. Dada la naturaleza bandeada de las arenas de canal y su dirección general de flujo hacia el este, se pueden realizar inferencias generales en relación a su distribución. Sin embargo, la clara falta de una migración lateral importante implica que los datos sísmicos y la cartografía directa de cinturones de canales son el modo más preciso de cartografiar su distribución. En términos de calidad de reservorio, se puede observar que la porosidad disminuye con la profundidad y por debajo de ca. 13000 pies las porosidades generalmente son < 10% (Figura 5). La pérdida de porosidad debida a la cementación por recrecimientos de cuarzo y la compactación debida a la diagénesis de enterramiento es más importante en la reducción de la porosidad que la formación de minerales de la arcilla en esas facies más arenosas. Por el contrario, las facies arenosas arcillosas pierden porosidad con la profundidad a un ritmo mayor y normalmente tienen una porosidad de < 10% a profundidades superiores a unos 9000 pies.

La Formación Mowry suprayacente representa un ambiente de plataforma restringida que comprende tres

# Cuencas y geología del petróleo

parasecuencias diferentes (Miembros F-H) separadas por bentonitas resultantes de eventos volcánicos discretos. Los Miembros H y G (especialmente el último) comprenden principalmente depósitos anóxicos de láminas submareales, mientras que el Miembro F consiste principalmente en laminas submareales disóxicas a subóxicas. Asimismo, se observaron arenas características de facies de transición y canales submareales, junto con evidencias indicativas de condiciones de aguas someras y la influencia de un flujo subacuoso oxigenado, corrientes mareales, etc.

Se utilizaron técnicas de modelización geofísica para capturar con precisión los parámetros de las litologías

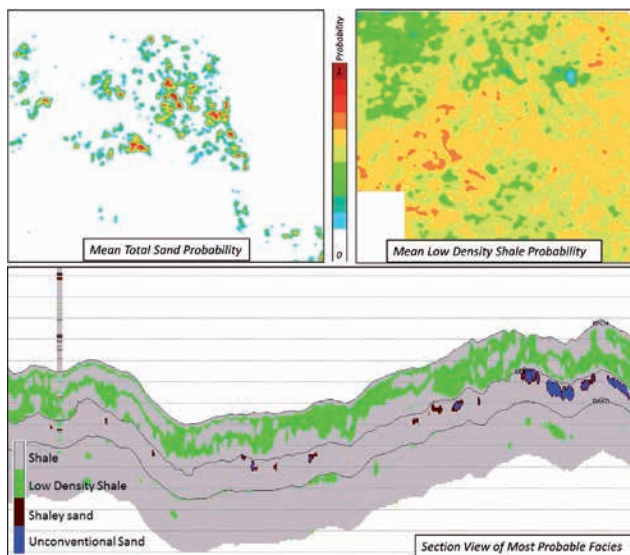


Figura 6 Análisis probabilidad de facies y fluidos (FFP, por sus siglas en inglés).

encontradas en los pozos de estudio, incluidas la porosidad, la saturación de agua y la mineralogía (arcilla, cuarzo, calcita, etc.). Los resultados se validaron frente a los datos SEM para garantizar la precisión. Además, se ha creado un modelo estable a partir de esos parámetros para generar curvas sísmicas de cizalla, que desempeñaron un papel importante en la posterior modelización geofísica y geomecánica. A partir de los registros elásticos se establecieron cinco litofacies y se examinaron frente a las observaciones de campo y de los testigos para ayudar a refinar el modelo geológico del subsuelo restringido sísmicamente.

Se realizaron procesos sísmicos de caracterización de yacimientos, como la inversión determinista preapilado y las predicciones de litofacies sísmicas (Figura 6), para integrar los datos petrofísicos y sísmicos resultantes en un modelo 3D de litología/facies para el Miembro Muddy y la Formación Mowry. El modelo de facies basado en la sísmica se utilizó para validar el modelo geológico del área de estudio.

Finalmente, se evaluaron las características del reservorio y de la roca generadora para identificar los riesgos principales del play para los tres miembros de la Formación Mowry, permitiendo generar mapas de segmentos de riesgo comunes que destacan las partes de la cuenca con mayor potencial de desarrollo de un play de esquistos en la zona de estudio. Se ha mostrado que el riesgo de la calidad de la fuente aumenta en áreas donde el aporte fluvial es mayor, dando lugar a un posible efecto de dilución clástica que disminuye los valores absolutos de COT y que está asociado con un influjo de kerógeno de tipo III que es menos propenso a generar petróleo. Además, este proceso está asociado con unas condiciones posiblemente más óxicas y con una menor probabilidad de

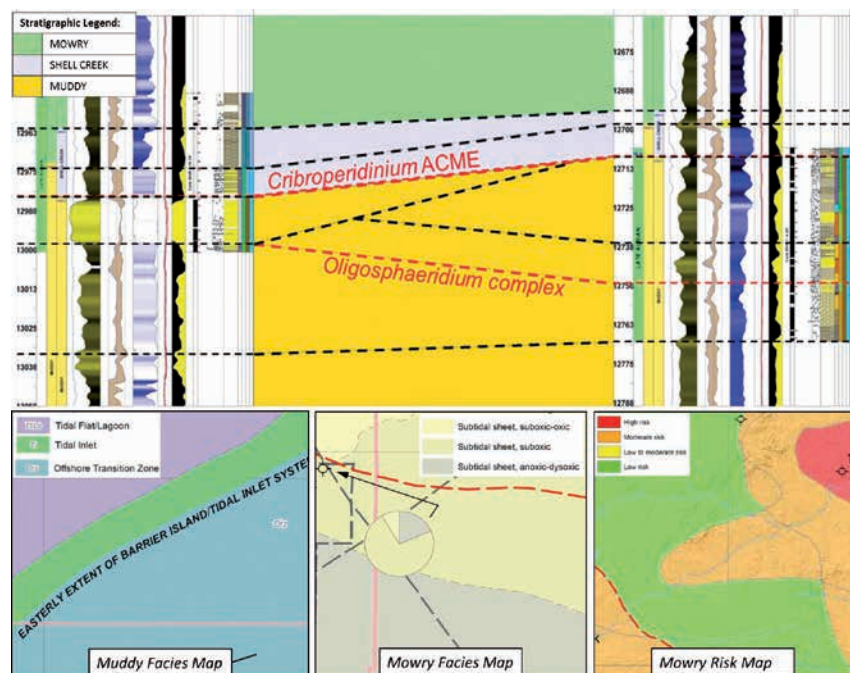


Figura 7 Fragmentos del panel de correlación (arriba) y de los mapas de facies y de riesgo (abajo).

## Cuencas y geología del petróleo

una buena conservación. Las regiones de madurez temprana de la cuenca se consideran un riesgo moderado porque se cree que la generación significativa de hidrocarburos únicamente ocurre desde el pico de la madurez del petróleo en adelante y está restringida a regiones geográficamente confinadas de la cuenca. Los mapas de riesgo de la madurez, la calidad de la fuente y los reservorios se han combinado para crear un mapa de riesgo general, Figura 7.

### Conclusión

A través de la combinación del análisis de testigos, registros cableados y sísmica hemos delineado con éxito la estratigrafía de las Formaciones Thermopolis a Frontier de la PRB. Somos capaces de cartografiar esas unidades a través de la cuenca y evaluar su extensión estratigráfica y espacial. Hemos utilizado este marco para respaldar una evaluación cuantitativa de la calidad de reservorio y la madurez de la roca generadora de las unidades clave dentro de la estratigrafía.

Aunque las componentes individuales pueden producir información valiosa, como las descripciones de testigos, la palinología, el análisis de registros, la selección de horizontes, etc., puede ser fácil malinterpretar estos datos y malinterpretar las observaciones principales derivadas. Aquí hemos sido capaces de combinar disciplinas geológicas clásicas con un análisis geofísico robusto para producir una solución geocientífica integrada.

El intervalo de Mowry y Muddy de la PRB sigue estando subexplorado y requerirá una importante inversión para revelar todo su potencial. En este estudio hemos evaluado varios de los factores que controlan la productividad y hemos identificado aquellas regiones con una mayor prospectividad a través de la cuenca.

### Referencias

- Barron, E.J., Hay, W.W. and Thompson, S. [1989] The hydrologic cycle, a major variable during Earth history. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **75**, 157-174.
- Brenner, R.L., Ludvigson, G.A., Witzke, B.L., Phillips, P.L., White, T.S., Ufnar, D.F., González, L.A., Joeckel, R.M., Goettmoeller, A., and Shirk, B.R. [2003] Aggradation of gravels in tidally influenced fluvial systems: upper Albian (Lower Cretaceous) on cratonic margin of the North American Western Interior foreland basin. *Cretaceous Research*, **24**, 439-448.
- Byers, C.W. and Larson, D.W. [1979] Paleoenvironments of Mowry Shale (Lower Cretaceous), Western and Central Wyoming. *AAPG Bulletin*, **63** (3), 354-375.
- Castillo, Gt., Voisey, S., Chesser, K., Coevering, N.V.D., Bouziat, A., Oliver, G., Ly, C.V. and Kuo, L. [2014] Integrating surface seismic, microseismic, rock properties and mineralogy in the Haynesville shale play. *First Break*, **32**, 71-77.
- Davis, H.R., Byers, C.W. and Pratt, L.M. [1989] Depositional mechanisms and organic matter in Mowry Shale (Cretaceous), Wyoming. *AAPG Bulletin*, **73** (9), 1103-1116.
- Dickinson, W.R. [2004] Evolution of the North American Cordillera. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **32**, 13-45.
- Kaufmann, E.G. [1984] Paleobiogeography and evolutionary response dynamic in the Cretaceous Western Interior Seaway of North America. In: Westermann, G.E.G. (Eds.) *Jurassic-Cretaceous biochronology and paleogeography of North America*. Geological Association of Canada Special Paper 27, 273-306.
- Melick, J.J. [2013] *Subsurface description and modelling of geologic heterogeneity in large subsurface datasets: Using temporal and scalar hierarchies. Powder River Basin, WY and MT, U.S.A.* Unpublished PhD thesis, Montana State University, Bozeman, Montana, 237.
- Miall, A.D., Catuneanu, O., Vakarelov, B.K. and Post, R. [2008] The Western Interior Basin. In: Miall, A.D. (Eds.) *Sedimentary Basins of the World*, **5**, 329-362.
- Oliver, G.M., Ly, C.V., Spence, G. and Rael, H. [2013] A new approach to measuring rock properties data from cores & cuttings for reservoir & completion characterization: an example from the Bakken formation. *13URCE-SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition*, Expanded Abstracts.
- Ufnar, D.F., Ludvigson, G.A., González, L.A. and Gröcke, D.R. [2008] Precipitation rates and atmospheric heat transport during the Cenomanian greenhouse warming in North America: Estimates from a stable isotope mass-balance model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **266**, 28-38.
- White, T., González, L., Ludvigson, G. and Poulsen, C. [2001] Middle Cretaceous greenhouse hydrologic cycle of North America. *Geology*, **29** (4), 363-366.